

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)

太原冬季 PM_{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)

盘锦市冬季 PM_{2.5} 水溶性离子特征及来源分析 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)

广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)

热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬勇 (2548)

亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)

京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)

北京北运河河流生态系统健康评价 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)

长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 董磊, 汤显强, 林莉, 邴超, 黎睿, 吴敏 (2588)

福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴 (2600)

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧贇 (2632)

重庆雪玉洞洞穴滴水水地球化学时空变化特征及其环境意义 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)

岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九程, 王正雄, 段世辉 (2651)

托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲柱, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)

西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)

四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验 王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 刘森, 陈开宁 (2706)

江汉平原水稻灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪霞 (2715)

冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)

臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)

中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)

海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试 杨宏, 胡银龙 (2763)

不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)

高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)

四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)

菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)

¹³C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)

江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 吕建树, 何华春 (2853)

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)

典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林子也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)

西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)

典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)

厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)

矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)

吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)

喷施锌肥对油菜镉生物可给性的影响 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)

废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)

颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)

防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)

《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响

刘德玲^{1,2}, 尹光彩¹, 陈志良^{2*}, 林亲铁¹, 刘千钧¹, 钟松雄^{2,3}, 黄玲², 张建强²

(1. 广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006; 2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655; 3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要: 蔬菜的安全生产是切断镉通过食物链进入人体的关键环节. 为研究硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和吸收镉的影响, 在实际镉污染蔬菜地设计 4 种不同处理(T1:0.5% 硅酸钙 + 0.5% 生物腐殖肥、T2:0.5% 硅酸钙 + 1.0% 生物腐殖肥、T3:1.0% 硅酸钙 + 0.5% 生物腐殖肥、T4:1.0% 硅酸钙 + 1.0% 生物腐殖肥)及空白对照(CK), 并分析不同条件下土壤 pH、DTPA 有效态镉、葱生物量和葱内镉含量随时间的变化. 结果表明, 4 种处理均能提高土壤 pH, 降低土壤 DTPA 有效态镉含量, 其中 T3 效果最明显, 14、28、42 和 56 d 时土壤 DTPA 有效态镉含量相对 CK 降幅分别为 60.71%、49.54%、44.63% 和 58.94%; 复配处理提高了葱地上部分生物量, 其中 T3 和 T4 促进作用更显著, 56 d 时生物量增幅分别为 107.19% 和 107.99%. 不同处理对葱吸收镉的影响不同, 56 d 时, T4 葱地上部分镉含量相对 CK 减少 43.80%, 有效减少植物对镉的累积, 同时提高葱地上部分生物量, T4 处理是较好的复配改良剂配比.

关键词: 镉; DTPA 有效态; 硅酸钙; 生物腐殖肥; 葱

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2927-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201709178

Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil

LIU De-ling^{1,2}, YIN Guang-cai¹, CHEN Zhi-liang^{2*}, LIN Qin-tie¹, LIU Qian-jun¹, ZHONG Song-xiong^{2,3}, HUANG Ling², ZHANG Jian-qiang²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China; 3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The safety of vegetable production is a key link in reducing cadmium consumption through the food chains. Field experiments were conducted to investigate the effects of composite materials (calcium silicate-biological humus fertilizer) on the growth of shallots and the uptake of Cd by shallots from contaminated agricultural soil. Four treatments (T1: 0.5% calcium silicate + 0.5% biological humus fertilizer; T2: 0.5% calcium silicate + 1.0% biological humus fertilizer; T3: 1.0% calcium silicate + 0.5% biological humus fertilizer; and T4: 1.0% calcium silicate + 1.0% biological humus fertilizer) and a control group (CK) were adopted. The changes in soil pH, DTPA-extractable Cd, biomass of shallots, and cadmium concentrations in shallots over time under different treatments were analyzed. The results show that the application of composite amendments decreased the concentrations of DTPA-extractable Cd in the soil. In particular, after T3 treatment, the concentrations of soil DTPA-extractable Cd decreased by 60.71%, 49.54%, 44.63%, and 58.94% after 14, 28, 42, and 56 d, respectively. The biomass of the shallots aboveground increased significantly by 107.99% and 107.19% after T3 and T4 treatment, respectively. The composite amendments exhibited different effects on the uptake of Cd by the shallots from the soil, and the T4 treatment was the most effective in immobilizing Cd and inhibiting translocation of Cd into the shallots. The cadmium concentration in the shallots decreased by 43.80% after 56 d with the T4 treatment. In conclusion, T4 is the optimum treatment for soil cadmium immobilization.

Key words: cadmium; DTPA-extractable; calcium silicate; biological humus fertilizer; shallots

土壤中的镉移动性较高, 易被蔬菜吸收并累积, 过量的镉会影响蔬菜的正常生长, 使蔬菜的产量和品质降低^[1,2]. 我国农田镉污染面积达 20×10^4 hm^2 , 每年受镉污染影响的农产品产量高达 14.6×10^8 kg ^[3]. 镉可以通过蔬菜可食部分转移到人体, 约占人体摄入镉的 70%^[4], 富集对人体健康造成伤害, 损伤肾脏, 干涉骨代谢, 已广泛引起公众的健康担忧^[5].

葱 (*Allium fistulosum* L.), 百合科葱属, 约 2 500 年的栽培历史, 是中国和东北亚, 欧洲和北美

收稿日期: 2017-09-20; 修订日期: 2017-12-04

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2017A030313245); 广东省科技计划项目(2017B020203001); 广州市科技计划-科学研究专项(201707010484); 广州市科技计划项目(201604030017, 201607010393)

作者简介: 刘德玲(1991~), 女, 硕士, 主要研究方向为中低浓度土壤铅镉的原位钝化修复, E-mail: delingliu437@163.com

* 通信作者, E-mail: chenzhiliang@scies.org

其他国家最重要的蔬菜之一, 其中我国葱的种植面积和产量约占蔬菜总量的3%^[6], 经济上占不容小觑的地位.

高耗能、高成本的物理化学方法和低成本、周期长的植物修复法都不适用于大面积中轻度镉污染农田土壤的修复; 而原位钝化修复技术投资小, 实施简便, 与常规的农业生产结合起来, 土壤重金属修复与农业生产同时进行, 常用于中轻度镉污染农田土壤的修复^[7]. 原位钝化修复技术中常用的钝化材料有硅钙物质、有机物料等, 其中硅钙物质主要包括硅酸钠^[8]、硅酸钙^[9]、硅肥^[10]、钢渣^[11]、石灰^[12]等. Gray 等的研究发现^[13], Si、Ca 能促进多种植物的生长, 有利于作物增产提质及其抗胁迫能力的提高. 陈翠芳等^[8]研究表明施加硅比不施加硅更有效地降低了白菜根、茎、叶中的镉含量. 同样地, 郑煜基等^[10]研究发现残渣态镉随着硅肥施用量的增加从 16.26% 增加到 22.66%. 另一方面, 作为土壤肥力改良剂的有机物料也是土壤重金属吸附剂、络合剂, 因而被广泛应用于土壤重金属污染修复中. 尽管不同有机质对镉的作用有所差异, 已有研究表明施加有机物料能提高土壤 pH、增大土壤阳离子交换量, 有利于土壤中形成难溶性金属有机络合物, 降低土壤有效态重金属的含量^[14].

目前国内外关于钝化改良剂对中轻度镉污染土

壤治理效果的研究, 多数是无机、有机改良剂本身, 单施无机或有机改良剂都能起到降低植物吸收镉的作用, 鲜有报道无-有机改良剂复配的研究^[15]. 为了符合我国当前国情, 提倡农业生态修复中轻度镉污染农田土壤, 大面积单独使用无机改良剂阻控 Cd, 将不能保证农作物长期可持续产出, 有机改良剂可以改善土壤肥力状况、提高土壤微生物和生物化学活性、促进养分循环^[16], 避免单施无机改良剂可能带来的危害^[17].

本研究施加硅酸钙和生物腐殖肥复配改良剂, 发挥彼此的优势和互补性, 在前期室内试验筛选出 4 个较佳配比的基础上, 大田试验条件下进一步研究复配改良剂对葱生长和镉吸收的影响, 以期为中轻度镉污染土壤安全利用与提高农业生产效率提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 土壤基本理化性质

受试土壤选择研究区 0~20 cm 表层土, 根据对角线法采样(采样点数大于 10), 以混合后的土样作为试验背景土. 土壤样品经风干、研磨过 100 目筛后进行基本理化性质分析(如表 1). 本研究土壤 pH 为 5.81, 总镉含量 $0.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超过土壤环境质量二级标准(GB 15618-1995, $\text{pH}\leq 6.5$, 总镉标准值 $\leq 0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

表 1 大田试验土壤的基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of test field soil

pH	含水率 /%	有机质 /%	CEC / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	铵态氮 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cd 总量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	DTPA-Cd / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
5.81	0.87	2.27	6.82	738.00	38.63	224.00	0.67	0.37

1.2 试验材料

硅酸钙 pH 值为 10.08, 镉含量 $0.0021 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 由广州围谷润仪器有限公司提供; 生物腐殖肥镉总量 $0.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (有机肥标准 NY525-2012 中镉限值指标 $\leq 3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 有机物总量 $\geq 85\%$, 有机质 $\geq 75\%$, 其中腐殖酸 $\geq 50\%$, 易氧化有机质 $\geq 20\%$, $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O} \geq 4\%$, 富含微量元素(Ca、Fe、Zn、Mn、B 等), 由嘉博文生物科技有限公司提供.

1.3 大田试验设计

大田试验基地位于广州市番禺区, 总面积约为 310 m^2 (图 1), 土地的耕作层为表层 20 cm, 施加复配改良剂前, 受试大田进行翻耕, 并分为 7 条田垄(每个小区间用 PVC 板隔开, 防止相邻小区间互相

影响), 田垄间距为 0.5 m. 大田试验共设 4 个处理组: T1 (0.5% 硅酸钙 + 0.5% 生物腐殖肥), T2 (0.5% 硅酸钙 + 1.0% 生物腐殖肥), T3 (1.0% 硅酸钙 + 0.5% 生物腐殖肥) 和 T4 (1.0% 硅酸钙 + 1.0% 生物腐殖肥) 和 CK (空白组). 大田试验采用当地的经济作物葱, 先种子育苗再移栽均匀种植. 在移栽 1 周前, 人工均匀泼洒复配改良剂, 旋耕机翻耕 5 遍, 以保证复配改良剂与表层土壤均匀混合. 不同处理组复配改良剂的添加量按照占土壤的质量分数计算(表 2), 不同处理组的葱按照当地的田间管理方式种植, 试验期间没有额外施肥, 试验周期为 56 d (2016-09-30 ~ 2016-11-28), 试验周期避开广东雨季, 尽量减少降雨对试验结果的影响.



图1 大田试验 CK、T1、T2、T3 和 T4 处理组分区示意

Fig. 1 Constructed fields for CK, T1, T2, T3, and T4 treatments for the test field experiments

表2 不同处理组添加复配改良剂的量

Table 2 Amount of composite amendments in the different treatments

处理组	复配改良剂	添加量/kg·hm ⁻²
CK	空白	—
T1	0.5% 硅酸钙 + 0.5% 生物腐殖肥	2 000 + 2 000
T2	0.5% 硅酸钙 + 1.0% 生物腐殖肥	2 000 + 4 000
T3	1.0% 硅酸钙 + 0.5% 生物腐殖肥	4 000 + 2 000
T4	1.0% 硅酸钙 + 1.0% 生物腐殖肥	4 000 + 4 000

1.4 采样和分析

施加复配改良剂后 14、28、42 和 56 d 时采集土壤样品, 测定土壤 pH、铵态氮、有效磷、速效钾、有机质和 DTPA 有效态镉. 土壤 pH 采用多参数分析仪 (DZS-708) 测定 (NY/T 1377-2007); 土壤铵态氮、有效磷和速效钾采用联合浸提比色法 (NY/T 1849-2010) 测定, 铵态氮用氨氮水样加标, 有效磷用水中磷酸盐 (以 P 计) 标液加标, 速效钾用 K 元素标液加标; 土壤有机质含量采用重铬酸钾容

量法-外加热法 (GB 9834-1988) 测定; 土壤 DTPA 有效态镉含量采用二乙烯三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法 (HJ 804-2016) 测定并使用土壤有效态成分分析标准物质 GBW07461 进行质量控制; 土壤总镉采用石墨炉原子吸收分光光度法 (GB/T 17141-1997), 使用国家标准物质 GBW07407 (GSS-7) 进行质量控制并用原子吸收分光光度-石墨炉法 (AA-7000, 日本) 测定.

施加复配改良剂后 28、42 和 56 d 时采集葱样, 不同处理组采集 6~10 棵葱样取平均值, 分地上部分和地下部分. 葱样先用自来水冲洗 2~3 次, 再用去离子水清洗干净, 用滤纸吸干多余的水, 75℃ 杀青 1 h, 105℃ 烘至恒重, 称量并记录, 然后研磨过 100 目筛用于总镉测定. 葱样总镉采用 HNO₃-HClO₄ 消解, 原子吸收分光光度-石墨炉法 (AA-7000, 日本) 测定.

1.5 数据处理

本试验作图采用 origin 8.5 软件; 单因素方差分析试验结果采用 SPSS 22.0 统计分析软件分析.

2 结果与分析

2.1 硅酸钙和生物腐殖肥复配对土壤 pH 和 DTPA 有效态镉的影响

由图 2(a) 可知, 施加硅酸钙和生物腐殖肥复配改良剂后, 土壤 pH 变化范围为 5.67~6.92, 变幅为 7.42%~15.82%. 其中, 14 d 时各处理土壤 pH 上升最显著, 比空白提高了 10.99%、11.55%、14.50% 和 15.82%. 28、42 和 56 d 时各处理土壤 pH 出现下降→上升→下降轻微波动, 但总体比 CK 土壤 pH 高, 按大到小排序为 T4 > T3 ≈ T2 > T1.

由图 2(b) 可知, 施加复配改良剂后, 各处理土壤

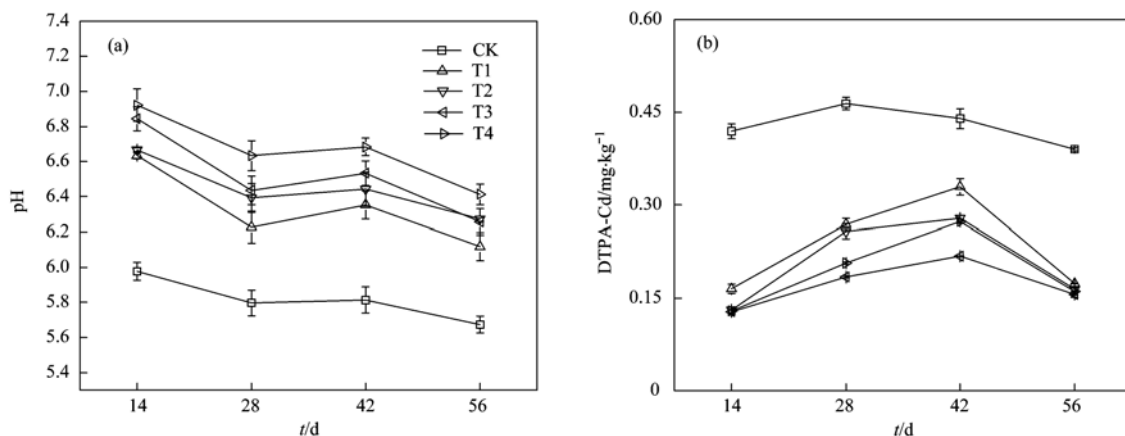


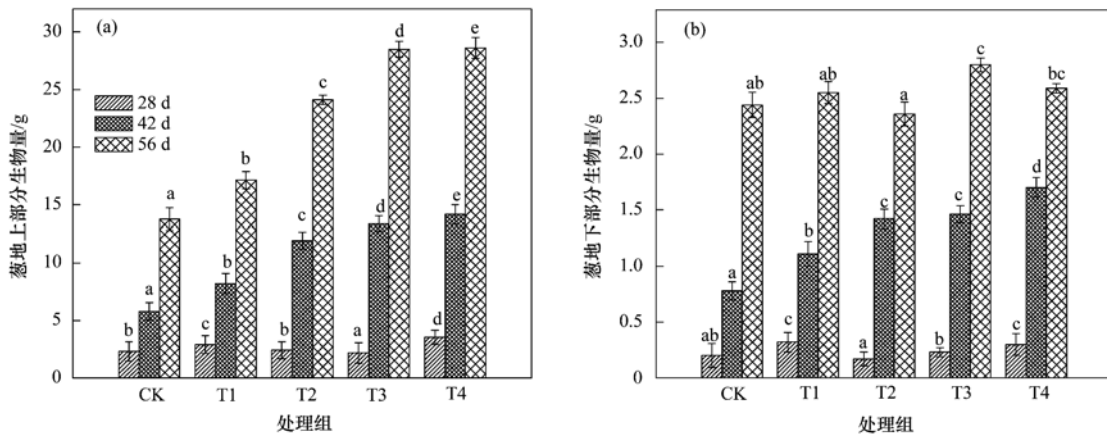
图2 施加复配改良剂 14、28、42 和 56 d 时土壤 pH 和 DTPA 有效态镉的变化

Fig. 2 Change in soil pH and DTPA-extractable cadmium after composite material application on 14, 28, 42, and 56 d

DTPA 有效态镉含量相对 CK 显著减少, 且 14 d 时最显著, 各处理土壤 DTPA 有效态镉含量均值在 0.128 ~ 0.165 mg·kg⁻¹ 之间, 差异不显著. 各处理土壤 DTPA 有效态镉含量呈现下降→上升→下降的变化趋势, 总体上相对 CK 减少, 各处理土壤 DTPA 有效态镉含量按小到大排序为 T3 < T4 < T2 < T1. 由此可见, T3 处理降低土壤 DTPA 有效态镉含量的效果最好, 14、28、42 和 56 d 时土壤 DTPA 有效态镉含量相对 CK 分别降低 60.71%、49.54%、44.63% 和 58.94%.

2.2 硅酸钙和生物腐殖肥复配后葱生物量的变化
试验期间, 各处理组均不施加额外的肥料, 由

图 3 可知, 各处理组葱样的生物量均比 CK 高, 其中 T3 和 T4 对葱的地上部分促进作用最显著, 56 d 时葱地上部分生物量增幅分别高达 107.99%、107.19%, 这与实地采样时观测到葱苗长势情况一致. 比较 T3 和 T1 以及 T4 和 T2 发现, 增加硅酸钙的施加量, 56 d 时葱地上部分生物量分别增加 66.18% 和 18.71%, 地下部分生物量分别增加 9.80% 和 9.75%. 同时, 比较 T1 和 T2 以及 T3 和 T4 可发现, 增加生物腐殖肥的施加量, 56 d 时葱地上部分生物量分别增加 40.83% 和 0.39%, 地下部分生物量没有明显差异.



同一时间不同处理组中不同字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$), 下同

图 3 不同处理组 28、42 和 56 d 时葱地上部分和地下部分的生物量

Fig. 3 Biomass of shallots aboveground and underground in different treatments on 28, 42, and 56 d

2.3 施加硅酸钙和生物腐殖肥后葱地上部分和地下部分镉含量的变化

不同硅酸钙和生物腐殖肥复配改良剂配比分别对各处理土壤铵态氮、有效磷、速效钾和有机质含量的影响不大(表 3), 而对各处理葱内镉含量影响不一(图 4). 由表 3 还可发现, 随着天数的增加,

对照中有机质显著增加, 可能是上一茬作物(白萝卜)残茬残留在土壤中, 逐渐分解提高土壤有机质含量的结果^[18]. 生物腐殖肥水平为 0.5%, 增加硅酸钙的施加量, T3 葱地上部分镉含量相对 T1 在 28、42、56 d 时分别减少 28.50%、25.08%、8.26%; 生物腐殖肥水平为 1.0%, 增加硅酸钙的

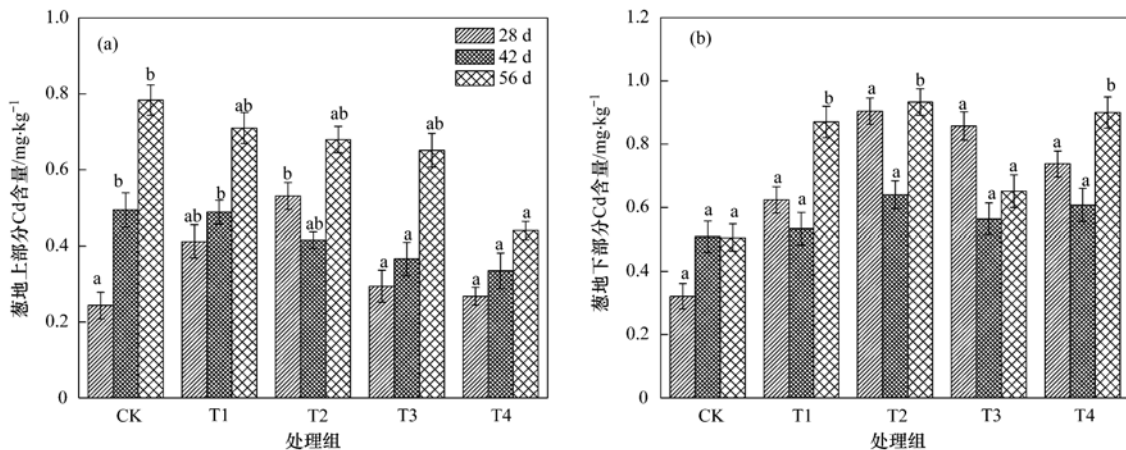


图 4 不同处理组 28、42 和 56 d 葱地上部分和地下部分镉含量

Fig. 4 Concentrations of cadmium of shallots aboveground and underground in different treatments on 28, 42, and 56 d

施加量, T4 葱地上部分镉含量相对 T2 在 28、42、56 d 时分别减少 49.50%、19.41%、35.18%。同一硅酸钙含量, 增加生物腐殖肥的施加量, T2 相对 T1 及 T4 相对 T3 葱地上部分镉含量也相对减少, 但不显著。同时增加硅酸钙和生物腐殖肥的施加量, T4 葱地上部分镉含量相对 T1 在 28、42、56 d

时分别减少 35.00%、31.39%、37.98%。不难发现, 56 d 时 T1、T2、T3 和 T4 葱地上部分镉含量相对 CK 分别减少 9.39%、13.31%、16.88% 和 43.80%; 相反, T1、T2、T3 和 T4 葱地下部分镉含量相对 CK 分别增加了 36.51%、84.67%、28.95% 和 78.12%。

表 3 各处理组 14、28、42 和 56 d 土壤铵态氮, 有效磷, 速效钾和有机质含量¹⁾

Table 3 Concentrations of ammonium nitrogen, available phosphorus and rapidly available potassium in soil on 14, 28, 42, and 56 d with different treatments

处理	铵态氮/mg·kg ⁻¹				有效磷/mg·kg ⁻¹			
	14 d	28 d	42 d	56 d	14 d	28 d	42 d	56 d
CK	18.80±1.00a	12.22±2.50a	18.71±1.13a	19.49±0.20a	830.00±28.38c	611.33±2.96a	531.00±18.34a	658.00±53.70a
T1	22.32±6.00a	20.84±0.37b	17.59±0.40a	18.58±1.26a	711.33±7.33ab	732.33±28.67b	746.33±34.65bc	689.00±27.61ab
T2	23.76±2.00a	21.07±0.79b	18.90±1.54a	24.38±2.39ab	682.00±39.21a	739.00±51.22b	707.33±10.41b	759.33±36.41ab
T3	51.88±13.65b	26.56±3.15b	20.52±0.33a	19.32±2.88a	781.67±15.60bc	750.67±33.39b	748.00±13.32bc	786.00±23.18b
T4	19.80±3.12a	24.24±1.57b	36.22±5.25b	26.95±1.42b	733.33±38.48ab	735.67±20.33b	808.00±8.96c	752.67±37.32ab

处理	速效钾/mg·kg ⁻¹				有机质/%			
	14 d	28 d	42 d	56 d	14 d	28 d	42 d	56 d
CK	270.33±21.07b	132.67±6.77a	127.67±2.03a	162.33±0.88b	4.22±0.05a	4.79±0.03a	4.57±0.06b	5.81±0.39ab
T1	135.00±18.77a	236.00±15.70b	133.33±22.52a	129.67±11.20a	5.27±0.56ab	4.40±0.09a	4.91±0.53b	5.60±0.21a
T2	149.67±12.47a	187.67±25.76ab	131.67±26.19a	133.00±2.52a	5.67±0.24b	5.47±0.23a	5.48±0.21b	6.46±0.26b
T3	193.00±26.63a	185.00±21.01ab	146.00±5.03a	143.00±7.77ab	5.60±0.38b	4.67±0.73a	2.45±0.66a	6.14±0.19ab
T4	162.33±17.63a	162.33±1.20a	171.00±16.70a	198.00±4.58c	5.14±0.49ab	5.50±0.040a	5.36±0.050b	5.40±0.030a

1) 不同字母表示同一时间不同处理组间土壤铵态氮, 有效磷, 速效钾和有机质含量存在差异显著 ($P < 0.05$)

2.4 葱内总镉与土壤 pH、DTPA 有效态镉、有机质和葱生物量之间的相关性分析

由表 4 可知, 不同处理组的土壤 DTPA 有效态镉与土壤 pH 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 土壤 pH 越大, DTPA 有效态镉含量越小, 如前所述, 这与 T1~T4 处理降低了土壤 DTPA 有效态镉含量并使得土壤 pH 上升有关; 同时, 土壤有机质含量越大,

土壤 DTPA 有效态镉含量也越低, 呈显著负相关 ($P < 0.05$)。葱地下部分总镉与土壤 DTPA 有效态镉呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 即土壤 DTPA 有效态镉含量相对较多, 而葱根部总镉含量相对较少。葱地上部分镉含量与葱的生物量成正相关, 与地上部分生物量和地下部分生物量的相关系数分别是 0.535 ($P < 0.05$) 和 0.700 ($P < 0.01$)。

表 4 葱内总镉与土壤 pH 值、DTPA 有效态镉、有机质和葱生物量之间的相关性分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis relationships among total cadmium in shallots, soil pH, DTPA-extractable cadmium, organic matter, and biomass of shallots

	有机质	土壤 DTPA-Cd	pH 值	葱地上部分 Cd	葱地下部分 Cd	葱地上部分生物量	葱地下部分生物量
有机质	1	-0.561 *	0.316	0.415	0.486	0.720 **	0.615 *
DTPA-Cd	—	1	-0.674 **	-0.125	-0.795 **	-0.522 *	-0.382
pH 值	—	—	1	-0.349	0.488	0.135	-0.019 0
葱地上部分 Cd	—	—	—	1	0.243	0.535 *	0.700 **
葱地下部分 Cd	—	—	—	—	1	0.328	0.222
葱地上部分生物量	—	—	—	—	—	1	0.935 **
葱地下部分生物量	—	—	—	—	—	—	1

1) * 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关, ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 上极显著相关

3 讨论

施加硅酸钙和生物腐殖肥复配改良剂后, 多孔水合硅酸钙大量水解^[19], 14 d 时各处理组土壤 pH 迅速提高; 缓慢的生物腐殖肥分解过程使得土壤

pH 呈现下降→上升→下降波动趋势。28 d 和 56 d 时各处理土壤 pH 不同程度地降低, 这可能与有机物料富含氮有关。氨化过程会释放 NH_4^+ 和 OH^- 离子, 但 NH_4^+ 硝化为硝态氮会产生两个 H^+ 离子, 整个过程产生的一个 H^+ 离子可能会导致土壤 pH 下

降。同样, Kirkham 等^[20]研究表明硝化作用也能使土壤 pH 降低。42 d 时各处理土壤 pH 不同程度地回升, 这可能与土壤溶液中氢离子的消耗有关。Xiao 等^[21]的研究发现腐殖酸所带的基团(比如羧基)能螯合氢离子。同时, 有机物料的分解和有机酸阴离子的去碳酸基都是消耗氢核的主要途径, 从而使土壤 pH 上升。

适合葱生长的土壤 pH 为 6.5 ~ 7.5, 本研究 CK 处理的土壤 pH 变化范围在 5.67 ~ 5.97, 而各处理组土壤 pH 均相对 CK 提高, 变化范围在 6.11 ~ 6.92。因此, 施加硅酸钙和生物腐殖肥复配改良剂能更好地满足葱生长的需要, 提高葱地上部分和地下部分的生物量。

土壤 DTPA 有效态镉含量与土壤 pH 呈极显著负相关($P < 0.01$), 土壤 pH 的提高使土壤有效态镉含量下降^[22~24], 土壤 pH 波动变化, DTPA 有效态镉含量也随之波动变化。土壤 pH 的提高使得黏土颗粒被破坏, 硅释放并与钙形成类似水泥的 Ca-Si-H 物质, 强化了石灰稳定化的土壤层, 还可能使土壤中氧化铝和二氧化硅的溶解性增大, 形成钙铝水合物和水合硅酸钙, 使沙质颗粒土壤变成坚硬的不渗透层, 将把重金属截留在土壤中而不易被浸出提取^[25]。土壤 pH 的提高使腐殖质更有效地络合 Cd^{2+} , 可能与 Ca^{2+} 能有效地絮凝腐殖质形成 Cd-HS-Ca 复合物^[26]有关, 降低土壤 DTPA 有效态镉含量^[27], 间接地减少镉在植物体内的累积^[28~30]。相反, Narwal 等^[31]发现猪粪作为有机质来源时, 小麦内镉的浓度显著增加, 而 Haghiri 等^[32]发现土壤有机质和燕麦内镉累积量没有相关性, 故有机质对土壤重金属有效态的影响不一且具体取决于有机质的来源和植物的种类^[33]。本研究添加生物腐殖肥有利于镉钝化但效果并不明显, 各处理组土壤 DTPA 有效态镉含量在 42 d 时表现最高, 可能是有机改良剂富含腐殖酸和溶解性有机质。其中, 溶解性有机质由低分子量的有机化合物(氨基酸和多酚类等)组成, 可与镉形成溶解性的重金属-有机复合物, 将提高土壤中镉的移动性^[34]。镉移动性变化也可能是由于有机改良剂长期转化发生水解作用, 氧化作用或解聚作用^[35]。研究表明^[36], 有机改良剂提升土壤活性, 增加蚯蚓及微生物数量, 土壤 DTPA 有效态镉含量提高可能是由于蚯蚓和多种微生物参与土壤腐殖质的分解破坏与 Cd 结合基团, Cd 重新释放出来。还有研究表明^[35], 蚯蚓粪微生物代谢过程中产生 NH_4^+ 、 CO_2 和有机酸, 可降低土壤 pH, 从

而增加土壤 DTPA 有效态镉含量。因此, 使用硅酸钙和腐殖酸复配改良剂有效弥补有机物料无法长时间固定化土壤中 Cd 这一缺陷, 各类有机质(腐殖质)对镉的固定化效果尚需进一步研究评估。

研究表明, 植物内镉含量与土壤 DTPA 有效态镉含量密切相关^[37]。硅酸盐对镉有吸附、钝化、螯合等作用^[38~40], 施加硅能降低土壤镉有效态, 抑制植物对镉的吸收^[20], 这可能与硅促进钙离子和金属离子竞争结合位点而缓解金属胁迫有关^[41]。相同地, 本研究硅酸钙施加量的增大使得土壤 DTPA 有效态镉含量降低, 葱地上部分镉含量也随之相对减少, 而葱根部镉含量相对 CK 增多, 与 Shi 等^[42]的研究结果一致, 硅能强化镉在稻秧根部的累积, 抑制镉从根部向茎部转移, 使茎部镉含量降幅达 33%。这可能是当植物根系暴露在 Cd 污染土壤时, 根部细胞壁上众多交换点能吸收和固定 Cd^{2+} 。另外, 硅酸盐与 Cd 能在细胞壁内共沉淀, 减少了共质体内 Cd^{2+} 浓度^[43], 从而抑制了 Cd 向植物地上部分转移^[44]。

本研究还发现, T3 土壤 DTPA 有效态镉含量比 T4 低, 但 T3 葱地上部分镉含量却稍微比 T4 高, 这说明土壤有效态镉含量与植物地上部分镉含量不一定是成显著正相关^[45]。镉主要由必需元素(Fe^{2+} , Ca^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} 和 Mg^{2+} 等)的特定和非特定转运蛋白运输, 通过根系吸收进入植物^[46], 而植物根系主要通过接触孔隙水吸收镉^[47], 所以植物地上部分镉含量主要受植物种类和土壤孔隙水含量的影响。Xiong 等^[48]在土壤接种根际微生物后, 东南景天对镉的吸收显著增加。同样地, 土壤接种微生物后, 天蓝遏蓝菜提取 Cd 的能力显著提高^[49]。相反, Dary 等^[50]发现接种 *Brady rhizobium* 的黄羽扇豆对 Cd 的吸收量下降。因此, 目前对涉及植物吸收镉的机制及过程尚不清楚, 需待进一步研究。

生物腐殖肥能给葱提供生长需要的营养元素, 增加土壤有机碳含量。有机碳含量作为营养库, 可以改善土壤营养循环, 改善土壤微生物区系, 提高土壤生物活性和生物肥力, 出现大量蚯蚓, 提高土壤阳离子交换能力和缓冲能力, 疏松透气并改善土壤的物理性质^[32]。不利的是, 根系和土壤微生物或蚯蚓的呼吸产生二氧化碳浓度使土壤 pH 下降, 间接地影响植物体内镉的累积量^[51]。Guo 等^[52]研究同样证实 CO_2 水平的提高会导致小麦和水稻组织内镉累积量增大。

由表 5 发现, 随着葱地上部分生物量的增加,

各处理抑制了葱地上部分对镉的吸收, 抑制效果 $T4 > T3 > T2 > T1$; 相反, 各处理葱地下部分对镉的吸收没有呈现抑制作用. 尽管 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 、 $T4$ 处理抑制葱地上部分对镉吸收的效果依次增强, 对应这 4 种处理的葱地下部分的镉吸收量则依次呈现出一定的增长或者较小的波动, 这可能与植物进化出的

重金属代谢机理使镉被固定在新陈代谢不活跃的部位有关, 如根部细胞^[53]等. Li 等的研究则表明^[54], 一些品种的葱具有较低的镉吸收量与其根部具有较低的镉累积量有关. 因此, 复配剂施加量更大时, 复配剂对镉的固定使得更少镉转运到地上部分的同时可能使得葱地下部分对镉的固定累积量更大.

表 5 不同处理组 28、42 和 56 d 时葱地上部分镉含量/地下部分镉含量和葱地下部分镉含量/土壤 DTPA 有效态镉含量比值¹⁾

Table 5 Ratios of aboveground/underground cadmium contents of shallots and underground cadmium contents of shallots/soil DTPA-extractable cadmium on 28, 42, and 56 d in different treatments

处理组	葱地上部分镉含量/葱地下部分镉含量			葱地下部分镉含量/土壤 DTPA 有效态镉含量		
	28 d	42 d	56 d	28 d	42 d	56 d
CK	0.57 ± 0.08 a	0.92 ± 0.14 b	1.50 ± 0.09 c	2.73 ± 0.37 a	2.30 ± 0.26 a	2.67 ± 0.34 a
T1	0.76 ± 0.25 a	0.80 ± 0.01 ab	0.85 ± 0.14 ab	2.47 ± 0.68 a	2.98 ± 0.39 a	5.01 ± 0.55 b
T2	0.69 ± 0.29 a	0.83 ± 0.06 ab	0.74 ± 0.06 ab	3.51 ± 0.88 ab	2.14 ± 0.65 a	5.70 ± 0.57 b
T3	0.35 ± 0.02 a	0.65 ± 0.03 a	0.99 ± 0.19 b	5.28 ± 1.05 b	2.73 ± 0.17 a	4.93 ± 0.53 a
T4	0.38 ± 0.03 a	0.63 ± 0.03 a	0.55 ± 0.06 a	3.62 ± 0.38 ab	2.94 ± 0.07 a	5.68 ± 0.78 b

1) 同一时间不同处理组中不同字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$)

4 结论

(1) 不同比例硅酸钙和生物腐殖肥复配均能提高土壤 pH, 降低土壤 DTPA 有效态镉含量, 土壤 DTPA 有效态镉与 pH 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), $T3$ 处理效果最显著.

(2) 不同比例硅酸钙和生物腐殖肥复配改善了土壤质量, 为植物生长提供必需的营养元素, 不同程度提高了葱地上部分的生物量, 尤其是 $T3$ 和 $T4$ 最显著, 56 d 时葱地上部分生物量相对 CK 分别增加了 107.99% 和 107.19%.

(3) 不同比例硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱吸收镉的影响不同. $T4$ 处理效果最好, 56 d 时 $T4$ 处理抑制土壤中镉向葱内迁移的效果最显著, 葱地上部分镉含量相对 CK 降幅达 43.80%.

参考文献:

- [1] Di Toppi L S, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants[J]. Environmental and Experimental Botany, 1999, 41(2): 105-130.
- [2] 杨超光, 豆虎, 梁永超, 等. 硅对土壤外源镉活性和玉米吸收镉的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 116-121.
- Yang C G, Dou H, Liang Y C, et al. Influence of silicon on cadmium availability and cadmium uptake by maize in cadmium-contaminated soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(1): 116-121.
- [3] 李坤权, 刘建国, 陆小龙, 等. 水稻不同品种对镉吸收及分配的差异[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 529-532.
- Li K Q, Liu J G, Lu X L, et al. Uptake and distribution of cadmium in different rice cultivars [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(5): 529-532.
- [4] Sarwar N, Saifullah, Malhi S S, et al. Role of mineral nutrition

- in minimizing cadmium accumulation by plants [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(6): 925-937.
- [5] Sigel A, Sigel H, Sigel R K O. Cadmium: from toxicity to essentiality[M]. Dordrecht: Springer, 2013. 1-29.
- [6] Li X H, Zhou Q X, Sun X Y, et al. Effects of cadmium on uptake and translocation of nutrient elements in different welsh onion (*Allium fistulosum* L.) cultivars [J]. Food Chemistry, 2016, 194: 101-110.
- [7] 王立群, 罗磊, 马义兵, 等. 重金属污染土壤原位钝化修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1214-1222.
- Wang L Q, Luo L, Ma Y B, et al. In situ immobilization remediation of heavy metals-contaminated soils: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(5): 1214-1222.
- [8] 陈翠芳, 钟继洪, 李淑仪, 等. 施硅对白菜体内镉的分布及其吸收迁移的影响[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(7): 89-92.
- Chen C F, Zhong J H, Li S Y, et al. Effect of silicon on cadmium distribution and its uptake and transport in Chinese cabbage [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(7): 89-92.
- [9] Yao A J, Wang Y N, Ling X D, et al. Effects of an iron-silicon material, a synthetic zeolite and an alkaline clay on vegetable uptake of As and Cd from a polluted agricultural soil and proposed remediation mechanisms [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2017, 39(2): 353-367.
- [10] 郑煜基, 陈能场, 张雪霞, 等. 硅肥施用对重金属污染土壤甘蔗镉吸收的影响研究初探[J]. 生态环境学报, 2014, 23(12): 2010-2012.
- Zheng Y J, Chen N C, Zhang X X, et al. Preliminary study on the effect of silicate fertilizers on cadmium absorption by sugarcane in heavy metal polluted farmland [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(12): 2010-2012.
- [11] Ning D F, Liang Y C, Liu Z D, et al. Impacts of steel-slag-based silicate fertilizer on soil acidity and silicon availability and metals-immobilization in a paddy soil [J]. PLoS One, 2016, 11

- (12): e0168163.
- [12] He Y B, Huang D Y, Zhu Q H, *et al.* A three-season field study on the *in-situ* remediation of Cd-contaminated paddy soil using lime, two industrial by-products, and a low-Cd-accumulation rice cultivar [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **136**: 135-141.
- [13] Gray C W, Dunham S J, Dennis P G, *et al.* Field evaluation of *in situ* remediation of a heavy metal contaminated soil using lime and red-mud [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **142** (3): 530-539.
- [14] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 农田重金属污染原位钝化修复研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(4): 721-728.
Li J R, Xu Y M, Liang X F, Lin D S, *et al.* *In situ* immobilization remediation of heavy metals in contaminated soils: a review [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23** (4): 721-728.
- [15] 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 309-313.
Wu L S, Zeng D M, Mo X R, *et al.* Immobilization impact of different fixatives on heavy metals contaminated soil [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 309-313.
- [16] Bulluck III L R, Brosius M, Evanylo G K, *et al.* Organic and synthetic fertility amendments influence soil microbial, physical and chemical properties on organic and conventional farms [J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, **19**(2): 147-160.
- [17] 董宁宇, 陈中敏, 宋丽娜, 等. 施用石灰和有机物质对酸性镉污染土壤的改良效果及其影响因素[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(2): 590-595.
Dong N Y, Chen Z M, Song L N, *et al.* Effect of liming and organic matter application on Cd uptake by ryegrass in a cadmium (Cd) contaminated soil and its influencing factors [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(2): 590-595.
- [18] 牛灵安, 郝晋珉. 盐渍化土壤肥力演变规律研究[J]. *土壤通报*, 2001, **32**(S0): 41-45.
Niu L A, Hao J M. Study on the changes in soil fertility of saline soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, **32**(S0): 41-45.
- [19] Zhao X L, Saigusa M. Effect of porous hydrated calcium silicate on sorption and desorption of cadmium by soils [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2004, **50**(3): 315-319.
- [20] Kirkham M B. Cadmium in plants on polluted soils; effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments [J]. *Geoderma*, 2006, **137**(1-2): 19-32.
- [21] Xiao A W, Ouyang Y, Li W C, *et al.* Effect of organic manure on Cd and As accumulation in brown rice and grain yield in Cd-As-contaminated paddy fields [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(10): 9111-9121.
- [22] Tözsér D, Magura T, Simon E. Heavy metal uptake by plant parts of willow species; a meta-analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, **336**: 101-109.
- [23] Zhou H, Zhou X, Zeng M, *et al.* Effects of combined amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on contaminated paddy soil [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **101**: 226-232.
- [24] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, *et al.* The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(1): 84-91.
- [25] Kostarelos K, Reale D, Dermatas D, *et al.* Optimum dose of lime and fly ash for treatment of hexavalent chromium-contaminated soil [J]. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2006, **6**(1-2): 171-189.
- [26] Meng F D, Yuan G D, Wei J, *et al.* Humic substances as a washing agent for Cd-contaminated soils [J]. *Chemosphere*, 2017, **181**: 461-467.
- [27] 代允超, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 石灰和有机质对不同性质镉污染土壤中镉有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(3): 514-519.
Dai Y C, Lü J L, Cao Y F, *et al.* Effects of lime and organic amendments on Cd availability in Cd-contaminated soils with different properties [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(3): 514-519.
- [28] 江巧君, 周琴, 韩亮亮, 等. 有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻镉吸收和分配的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(1): 9-14.
Jiang Q J, Zhou Q, Han L L, *et al.* Effects of organic manure on uptake and distribution of cadmium in different rice genotypes under cadmium stress [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(1): 9-14.
- [29] Wei S H, Li Y M, Zhou Q X, *et al.* Effect of fertilizer amendments on phytoremediation of Cd-contaminated soil by a newly discovered hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **176**(1-3): 269-273.
- [30] Chen S Y, Leng S, Chen L K, *et al.* Effect of organic fertiliser on plant growth and heavy metals Cu(II), Pb(II) translocation in plants [J]. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 2016, **19**(1): 59-73.
- [31] Narwal R P, Singh B R. Effect of organic materials on partitioning, extractability and plant uptake of metals in an alum shale soil [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1998, **103**(1-4): 405-421.
- [32] Haghiri F. Plant uptake of cadmium as influenced by cation exchange capacity, organic matter, zinc, and soil temperature [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1974, **3**(2): 180-183.
- [33] Putwattana N, Kruatrachue M, Pokethitoyook P, *et al.* Immobilization of cadmium in soil by cow manure and silicate fertilizer, and reduced accumulation of cadmium in sweet basil (*Ocimum basilicum*) [J]. *ScienceAsia*, 2010, **36**(4): 349-354.
- [34] Khan M A, Khan S, Khan A, *et al.* Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **601-602**: 1591-1605.
- [35] Gusiati Z M, Kulikowska D. Behaviors of heavy metals (Cd, Cu, Ni, Pb and Zn) in soil amended with composts [J]. *Environmental Technology*, 2016, **37**(18): 2337-2347.
- [36] Li F, Okazaki M, Zhou Q. Evaluation of Cd uptake by plants estimated from total soil Cd, pH, and organic matter [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, **71**(4): 714-721.
- [37] Nolan A L, Zhang H, McLaughlin M J. Prediction of zinc, cadmium, lead, and copper availability to wheat in contaminated soils using chemical speciation, diffusive gradients in thin films,

- extraction, and isotopic dilution techniques [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, **34**(2): 496-507.
- [38] Loganathan P, Hedley M J, Grace N D. Pasture soils contaminated with fertilizer-derived cadmium and fluorine: livestock effects[A]. In: Whitacre D M (Ed.). *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*[M]. New York: Springer, 2008. 29-66.
- [39] Han J, Xu Y M, Liang X F, *et al.* Sorption stability and mechanism exploration of palygorskite as immobilization agent for Cd in polluted soil[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, **225**(10): 2160.
- [40] Coles C A, Yong R N. Aspects of kaolinite characterization and retention of Pb and Cd[J]. *Applied Clay Science*, 2002, **22**(1-2): 39-45.
- [41] Li L B, Zheng C, Fu Y Q, *et al.* Silicate-mediated alleviation of Pb toxicity in banana grown in Pb-contaminated Soil [J]. *Biological Trace Element Research*, 2012, **145**(1): 101-108.
- [42] Shi X H, Zhang C C, Wang H, *et al.* Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings[J]. *Plant and Soil*, 2005, **272**(1-2): 53-60.
- [43] Wang L J, Wang Y H, Chen Q, *et al.* Silicon induced cadmium tolerance of rice seedlings[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, **23**(10): 1397-1406.
- [44] 魏树和, 杨传杰, 周启星. 三叶鬼针草等 7 种常见菊科杂草植物对重金属的超富集特征[J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2912-2918.
Wei S H, Yang C J, Zhou Q X. Hyperaccumulative characteristics of 7 widely distributing weed species in composite family especially *Bidens pilosa* to heavy metals [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(10): 2912-2918.
- [45] Smith S R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge[J]. *Environment International*, 2009, **35**(1): 142-156.
- [46] Llugany M, Miralles R, Corrales I, *et al.* *Cynara cardunculus* a potentially useful plant for remediation of soils polluted with cadmium or arsenic [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, **123**: 122-127.
- [47] de Voogt P. Reviews of environmental contamination and toxicology volume 241[M]. Cham: Springer, 2015. 73-137.
- [48] Xiong J B, He Z L, Liu D, *et al.* The role of bacteria in the heavy metals removal and growth of *Sedum alfredii* Hance in an aqueous medium[J]. *Chemosphere*, 2008, **70**(3): 489-494.
- [49] Epelde L, Becerril J M, Barrutia O, *et al.* Interactions between plant and rhizosphere microbial communities in a metalliferous soil [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(5): 1576-1583.
- [50] Dary M, Chamber-Pérez M A, Palomares A J, *et al.* "In situ" phytostabilisation of heavy metal polluted soils using *Lupinus luteus* inoculated with metal resistant plant-growth promoting rhizobacteria[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **177**(1-3): 323-330.
- [51] Hinsinger P, Plassard C, Tang C X, *et al.* Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review[J]. *Plant and Soil*, 2003, **248**(1-2): 43-59.
- [52] Guo H Y, Zhu J G, Zhou H, *et al.* Elevated CO₂ levels affects the concentrations of copper and cadmium in crops grown in soil contaminated with heavy metals under fully open-air field conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(16): 6997-7003.
- [53] Rizwan M, Ali S, Adrees M, *et al.* A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables [J]. *Chemosphere*, 2017, **182**: 90-105.
- [54] Li X H, Zhou Q X, Wei S H, *et al.* Identification of cadmium-excluding welsh onion (*Allium fistulosum* L.) cultivars and their mechanisms of low cadmium accumulation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, **19**(5): 1773-1780.

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-jin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysochloris ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing; An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)